第40卷 第3期
2023年3月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 3
Mar. 2023

陕西省水生态足迹深度与广度时空格局及影响因素

马晓蕾[1,2]， 乔雅琦[3]， 王 婕[3]， 焦士兴[3]， 张 曼[3]

（1. 淮阴师范学院城市与环境学院，江苏 淮安 223300；2. 淮阴师范学院，江苏高校哲学社会科学重点研究基地-淮河生态经济带研究院，江苏 淮安 223300；3. 安阳师范学院资源环境与旅游学院，河南 安阳 455000）

摘 要：运用水生态足迹及其深度与广度评价方法，对2000—2019年陕西省水生态足迹、承载力、深度与广度时空格局进行研究。从经济、人口、环境、农业和水利5个方面，构建水生态足迹影响因素指标体系，采用CFEM模型对水生态足迹成因进行分析。结果表明：（1）陕西省水生态足迹总体呈波动上升趋势，多年均值为1403×10^4 hm^2，其中，农业水生态足迹占比最高，多年平均占比为66.65%，工业和居民生活水生态足迹占比分别为15.84%和13.39%；（2）陕西省水生态承载力年际分配不均衡，在603.5×10^4 hm^2~3741×10^4 hm^{2}间波动，多年均值为1632.9×10^4 hm^2，高于水生态足迹，处于水生态盈余状态；（3）近10 a，陕西省主要以消耗水资源流量资本为主，水生态足迹广度处于较高水平，但2001年和2016年，水资源存量资本消耗量大；（4）陕西省水生态承载力与水生态足迹区域差异大，但年际变化相对较小；（5）经济发展水平、人口和水库库容，对陕西省水生态足迹具有显著的正向影响。为加强陕西省水生态承载力，应进一步完善和巩固水利工程设施建设，增加水库库容，完善水资源管理制度，强化水资源刚性约束。

关键词：水生态足迹与承载力；水生态足迹深度；水生态足迹广度；个体固定效应模型（CFEM）；影响因素

黄河是中华民族的母亲河，也是我国重要的生态安全屏障。多年来黄河面临着生态本底差，水资源短缺，水土流失严重等问题，其中水资源短缺是黄河流域面临的最大挑战。陕西省地跨黄河、长江两大流域，其中，陕西省内黄河流域面积占全省总面积的64.8%，属黄河流域中游，2020年人均水资源量为1062.4 m^3，为全国平均水平的47.5%。陕西省水资源时空分布不均衡问题十分突出，水资源供给量和需求量区域差异大。陕北地区水资源短缺严重，大部分地区降水量仅300~400 mm，关中大部分地区约600~800 mm，陕南地区水资源较为充足，大部分地区降水700~1000 mm[1]。随着经济社会快速发展，人民生活水平的不断提高，以及生态环境的不断改善，用水量也随之增加，陕西省用水结构不断发生着变化，如何保障区域水资源可持续发展，缓解水资源时空分布不均衡，在有限的供给下实现其可持续利用，成为当前陕西省面临的重要问题。

水生态足迹用于衡量人类活动对水资源的占用情况，由生态足迹概念衍生而来，也是生态足迹评价的重要部分。在评价区域水生态足迹时，常与水生态承载力、水生态盈亏等相关指标相结合，综合反应区域水资源可持续利用情况。近年来，越来越多学者对水生态足迹研究内容和方法进行了深入研究，主要包括以下几方面：第一，基于水生态足迹和承载力模型的全国、省和市级区域尺度，水生态足迹、承载力和负载（盈亏）等时空动态特征研究[2-6]，如Dai等[7]评价了张家口市水生态承载能力；Su等[8]对中国4个直辖市水生态足迹进行了动态评价及预测。第二，水生态足迹研究方法的完善，包括三维水生态足迹模型，以及水量和水质生态足迹的研究[9-11]。方恺[12]在生态足迹研究方法基础上，提出了三维生态足迹，包括足迹广度和足迹深度，李鹏辉等[13]运用改进三维生态足迹模型对2000—2016年天山北麓绿洲生态安全进行了研究，该方法同样适用于水生态足迹广度和深度的量化。水生态足迹广度反应人类对水资源流量资本的消耗情况，其上限值等于

收稿日期：2022-03-30； **修订日期**：2022-06-06
基金项目：河南省重点研发与推广专项软科学研究（222400410283）
作者简介：马晓蕾（1989-），女，讲师，博士，研究方向为经济地理与区域可持续发展. E-mail: maxiaolei0111@163.com

区域水生态承载力;水生态足迹深度反应人类对水资源存量资本的消耗,值越大,表明区域水资源开发利用强度越高,可持续发展能力越弱[14];Liang等[15]采用三维水生态足迹模型对武汉都市圈水资源可持续水平进行了评估;张义等[16]提出改进的水生态足迹模型,从水量和水质全面衡量水生态足迹,使得对水资源的评价更加全面。第三,水生态足迹影响因素研究。目前对水生态足迹驱动因素的分析,学者们大多采用LMDI模型(即指数分解法),从人口、经济、技术和结构效应4个方面进行研究[17-20]。

综上所述,目前关于水生态足迹、承载力和盈亏等相关研究较为丰富,但对水生态足迹广度和深度的实证研究还较为缺乏,且对陕西省水生态足迹的相关研究较少。此外,对水生态足迹影响因素研究的指标选取和研究方法有待完善。基于此,本文以陕西省为例,将水生态足迹、水生态承载力、水生态盈亏指数,与水生态足迹深度和广度相结合,从时间演化和空间格局两方面展开研究,并结合陕西省水资源开发利用实际情况,构建影响因素的指标体系,采用面板数据模型中的FEM模式,分析陕西省水生态足迹的影响因素,使得结果更符合区域发展实际。研究结果可为陕西省水资源开发利用和可持续发展提供科学依据。

1 研究方法与数据来源

1.1 研究方法

1.1.1 *水生态足迹、承载力及盈亏指数* 水生态足迹是人类生产、生活以及自然环境等所需占用的水资源面积[21],计算原理是将用水量转化为用地面积。本文计算陕西省农业(包括农田灌溉和林牧渔蓄用水)、工业、城镇公共、居民生活及生态环境5个账户的水生态足迹,以及总水生态足迹,计算方法见公式(1)[22-23]。

$$EF_w = \sum_{i=1}^{5} EF_{wi} = \gamma \times \left(\sum_{i=1}^{5} W_i / P_w \right) \tag{1}$$

式中:EF_w为总水生态足迹(hm²);EF_{wi}为i账户水生态足迹(hm²);γ为全球水资源均衡因子;W_i为i账户的用水量(m³);P_w为全球水资源平均生产能力(m³·hm⁻²)。

水生态承载力是指在扣除区域维持生态环境用水需求后(占水资源总量的60%)[24],剩余水资源为人类生产活动提供的生物生产性土地面积,EC_w值越高,水生态承载力越强[25-27],计算公式如下:

$$EC_w = 0.4 \times \gamma \times \varphi \times \left(Q / P_w \right) \tag{2}$$

$$\varphi = \frac{Q}{S \times P_w} \tag{3}$$

式中:EC_w为水生态承载力(hm²);φ为研究区水资源产量因子等于水资源平均生产能力(Q/S)与P_w的比值;Q为水资源总量(m³);S为水资源计算面积(hm²);0.4表示区域水资源开发利用量,占水资源总量的40%[24]。为使研究结果与目前大多数文献之间具有可比性,本文γ取5.19,P_w取3140 m³·hm⁻²[28]。

水生态盈亏为水生态承载力与水生态足迹之间的差值,反应水资源供需平衡情况[29],计算方法见公式(4)。

$$EB_w = EC_w - EF_w \tag{4}$$

式中:EB_w为水生态盈亏(hm²);$EB_w>0$,表明区域处于水生态盈余状态,水生态承载力较强,且有进一步开发利用的空间;$EB_w=0$,表明处于水生态平衡状态;$EB_w<0$,表明处于水生态赤字状态,水资源开发利用量已超过可开发上限,水生态承载能力较弱[30-31]。

1.1.2 *水生态足迹广度与深度* 水生态足迹等于水生态足迹深度与广度的乘积,其中,水生态足迹广度是人类生产生活对水资源流量资本的占用情况,反应同一时期,不同区域之间水资源利用的公平性差异;水生态足迹深度是人类对水资源存量资本的消耗程度,反应同一区域,不同时期水资源消费的公平性差异,深度值越大,区域对超出水生态承载力部分的水资源消耗量越大,水资源可持续性越弱[32],计算公式如下[14,33-35]:

$$EF_w = EF_{ws} \times EF_{wd} \tag{5}$$

$$EF_{ws} = \min[EF_w, EC_w] \tag{6}$$

$$EF_{wd} = 1 + \frac{\max[EF_w - EC_w, 0]}{EC_w} \tag{7}$$

式中:EF_{ws}为水生态足迹广度(hm²),取值范围为[0, EC_w],值越高,表明水资源流量资本的消耗越大,当流量资本消耗超过水生态承载力值时,则需要消耗存量资本;EF_{wd}为水生态足迹深度,取值范围为≥1,当区域水生态足迹小于承载力时,$EF_{wd}=1$,表明此时消耗水资源流量资本即可满足水资源需求;当$EF_{wd}>1$时,表明区域水资源超载,水资源流量资本不足,需消耗存量资本。EF_{wd}值越高,区域水资源可持续性越弱。

1.1.3 水生态足迹影响因素分析　采用个体固定效应模型(Cross-section Fixed Effects Model,CFEM)分析陕西省水生态足迹的影响因素。根据陕西省水资源利用特点,综合考虑经济、人口、环境、农业和水利等方面,选取16个指标(表1),经济方面选取地区生产总值、地方一般公共预算、城镇居民人均可支配收入、农村居民人均可支配收入4个指标,其中地方一般公共预算收入有助于促进区域在水利设施建设方面的投资,保障区域水资源供给;常住人口数量和人均日生活用水量主要影响生活用水量;人均公园绿地面积影响城市生态环境用水量;农业类指标中水田和水浇地面积与农业耗水量紧密相关,荒山荒地造林面积与林业用水相关,肉类总产量与畜牧业耗水直接相关;水利条件的优劣对区域节水以及保障区域用水都有着重要影响。2015年由于缺少节水灌溉面积指标,运用相邻年份节水灌溉面积占灌溉面积比重,乘以缺失年份的灌溉面积估算而来。面板数据由2010—2019年陕西省10个地级市16项指标构成。分析过程如下:

(1) 运用SPSS软件中的Z-score标准化方法,对水生态足迹及16项指标进行标准化处理。计算公式如下:

$$Z\text{-score}\left(x_k\right)=\frac{x_k-\mu}{\delta} \tag{8}$$

式中:Z-score(x_k)表示第k个指标的标准化得分;x_k表示指标实际值;μ表示总体数据的均值;δ表示总体数据的标准差。

(2) 确定分析模型。运用EViews软件采用固定效应模型(Fixed Effects Model,FEM)中的个体固定效应模型(CFEM)进行影响因素分析。通过建立模型和模型检验,得到的个体固定效应模型R^2值越高,表明分析结果的可信度越高,模型表达式如下[35]:

$$Y_{it}=\sum_{k=1}^{K}x_{kit}\beta_k+\lambda_i+\varepsilon_{it} \tag{9}$$

式中:Y_{it}为被解释变量,表示个体i在时刻t的值;i表示第i个地级市,本文共10个地级市取值0~10;t表示2010—2019年10个年份,取值1~10;k表示16项分析指标,取值1~16;x_{kit}为个体i在时刻t的第k个解释变量;β_k为指标k的回归系数;λ_i为个体i回归系数;ε_{it}为误差项。

(3) 对建立的个体固定效应模型进行残差分析。残差指因变量的观测值与采用回归方程得出的预测值之差,能够反映用回归方程进行估计所引起的误差。残差平方和表示随机误差效应,其值越小,模型拟合度越高。

1.2 数据来源

农田灌溉、林牧渔畜、工业、城镇公共、居民生活和生态环境用水量,以及各地市水资源总量和计算面积数据,来源于2000—2020年《陕西省水资源

表1 水生态足迹影响因素

Tab. 1 Influencing factors of water ecological footprint

指标类型			指标名称
水生态足迹	经济指标(换算为可比价)		生产总值/10^9元
			地方一般公共预算收入/10^4元
			城镇居民人均可支配收入/元
			农村居民人均可支配收入/元
	人口指标		常住人口/10^4人
	环境指标		人均日生活用水量/L
			人均公园绿地面积/m^2
	农业指标	种植业	水田面积/10^3 hm^2
			水浇地面积/10^3 hm^2
			单位面积粮食产量/($kg\cdot hm^{-2}$)
			节水灌溉类机械/套
		林业	荒山荒地造林面积/hm^2
		畜牧业	肉类总产量/t
	水利条件指标		水利建设投资总计/10^4元
			节水灌溉面积/10^3 hm^2
			水库库容/10^4 m^3

公报》,其中,2000—2002年缺少城镇公共和生态环境用水量数据,咸阳市数据包含杨陵区。陕西省水资源总量、计算面积和年底总人口,以及水生态足迹影响因素指标数据,来源于《陕西省统计年鉴》(2001—2021)。2000—2019年陕西省各地市水资源产量因子(φ),由相应年份的水资源总量及计算面积计算得到(表2)。

表2 陕西省各地市水资源产量因子值

Tab. 2 The yield factor value of water resources in cities of Shaanxi Province

地区	2000年	2005年	2010年	2019年
西安	0.72	1.00	0.90	0.90
铜川	0.12	0.13	0.33	0.19
宝鸡	0.35	0.59	0.67	0.62
咸阳	0.16	0.15	0.21	0.18
渭南	0.28	0.28	0.32	0.26
延安	0.07	0.08	0.09	0.08
榆林	0.15	0.13	0.13	0.15
汉中	1.47	2.09	2.12	2.45
安康	1.28	2.00	1.90	1.86
商洛	0.75	0.93	1.13	0.60
平均值	0.53	0.74	0.78	0.73

2 结果与分析

2.1 时间演变趋势

2.1.1 水生态足迹 2000—2019年陕西省水生态足迹总体呈波动上升趋势(图1),由2000年的1300×10^4 hm^2,上升到2019年的1529×10^4 hm^2,多年平均值为1403×10^4 hm^2。农业水生态足迹最高,多年平均值占总水生态足迹的66.65%,其次为工业和居民生活,分别占15.48%和13.39%,城镇公共和生态环境占比较低,分别为2.9%和2.3%。

2000—2019年,农业水生态足迹呈波动变化趋势,2010年后趋于平稳;工业水生态足迹变化幅度较小,但2011年后呈缓慢上升趋势;城镇公共用水量明显上升;居民生活水生态足迹也呈明显增长趋势;生态环境水生态足迹增长幅度最大,由2003年的1.49×10^4 hm^{2}增长到74.05×10^4 hm^2,说明陕西省生态环境保护力度不断增强,生态环境用水量不断增加。陕西省人均水生态足迹呈波动上升趋势,但增长幅度较小。

2.1.2 水生态承载力与水生态盈亏 陕西省水生态承载力和人均水生态承载力年际变化大,2011年最高,2001年最低。水生态承载力多年平均值为1632.9×10^4 hm^2,高于水生态足迹均值,表明陕西省水资源多年均值处于盈余状态(表3)。2000—2019年陕西省有10个年份处于水生态亏损状态,2003年水生态盈余最高,2016年由于降雨量较少,水生态亏损值最大。

2.1.3 水生态足迹深度与广度 2000—2019年,陕西省水生态足迹深度与广度值之间呈互补态势(图2)。水生态足迹广度处于波动上升趋势,表明水生态承载力呈增强趋势,但年际差距大,导致个别年份水资源超载情况较严峻。其中,2001年水足迹广度最低,而水生态足迹深度值最高,达2.1,水资源存量资本消耗大,处于较严重超载状态。水生态足迹

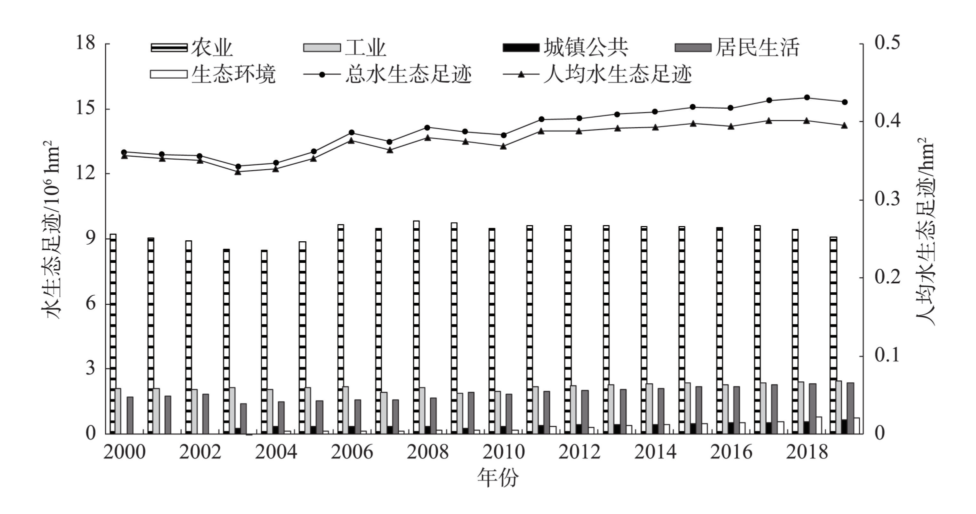
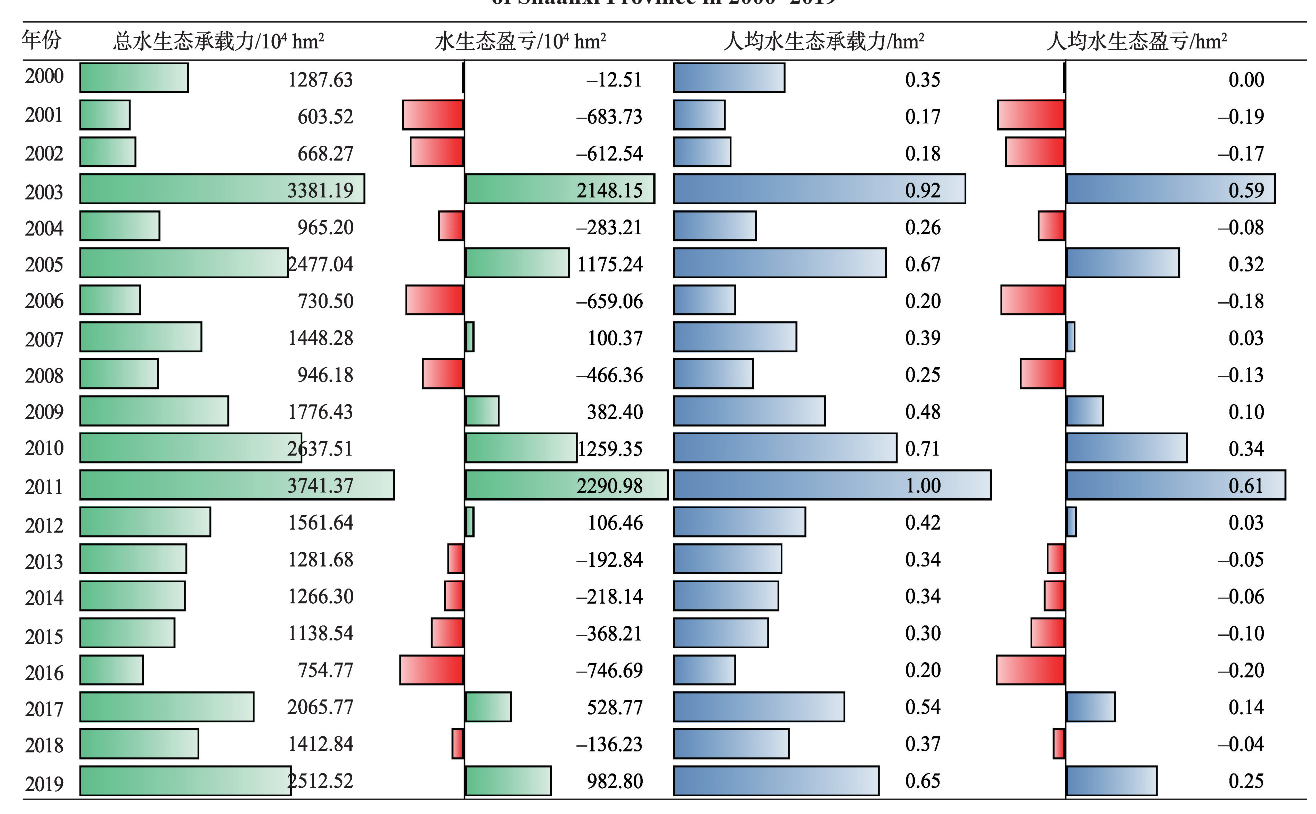


图1 2000—2019年陕西省水生态足迹变化趋势

Fig. 1 Trend of water ecological footprint in Shaanxi Province from 2000 to 2019

表3 2000—2019年陕西省水生态承载力与水生态盈亏指数变化

Tab. 3 Changes in water ecological carrying capacity and water ecological profit and loss index of Shaanxi Province in 2000–2019



年份	总水生态承载力/10⁴ hm²	水生态盈亏/10⁴ hm²	人均水生态承载力/hm²	人均水生态盈亏/hm²
2000	1287.63	–12.51	0.35	0.00
2001	603.52	–683.73	0.17	–0.19
2002	668.27	–612.54	0.18	–0.17
2003	3381.19	2148.15	0.92	0.59
2004	965.20	–283.21	0.26	–0.08
2005	2477.04	1175.24	0.67	0.32
2006	730.50	–659.06	0.20	–0.18
2007	1448.28	100.37	0.39	0.03
2008	946.18	–466.36	0.25	–0.13
2009	1776.43	382.40	0.48	0.10
2010	2637.51	1259.35	0.71	0.34
2011	3741.37	2290.98	1.00	0.61
2012	1561.64	106.46	0.42	0.03
2013	1281.68	–192.84	0.34	–0.05
2014	1266.30	–218.14	0.34	–0.06
2015	1138.54	–368.21	0.30	–0.10
2016	754.77	–746.69	0.20	–0.20
2017	2065.77	528.77	0.54	0.14
2018	1412.84	–136.23	0.37	–0.04
2019	2512.52	982.80	0.65	0.25

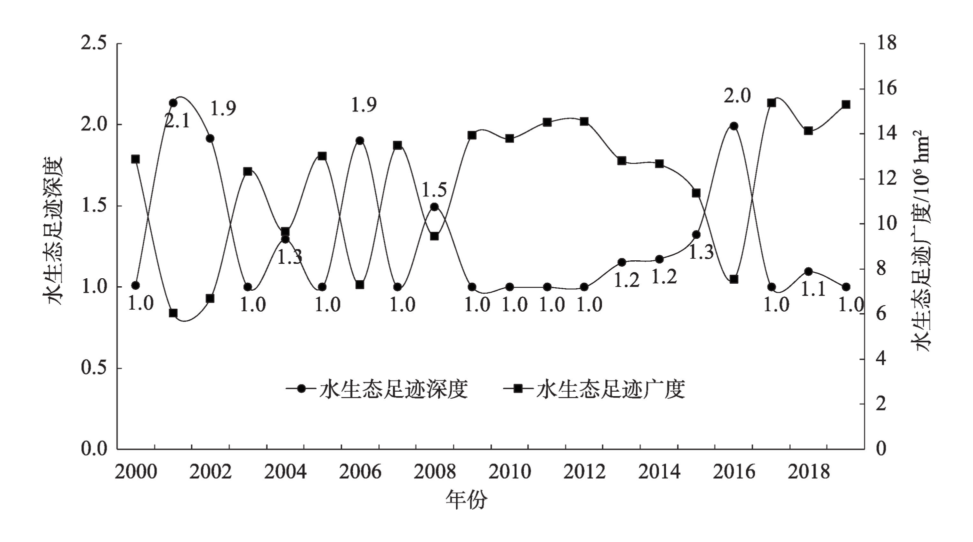


图2 2000—2019年陕西省水生态足迹广度与深度随时间变化

Fig. 2 Water ecological footprint size and depth of Shaanxi Province changed over time from 2000 to 2019

深度值为1的年份,只需消耗水资源流量资本即可满足水资源需求,水资源承载力较强。

2.2 空间格局演变

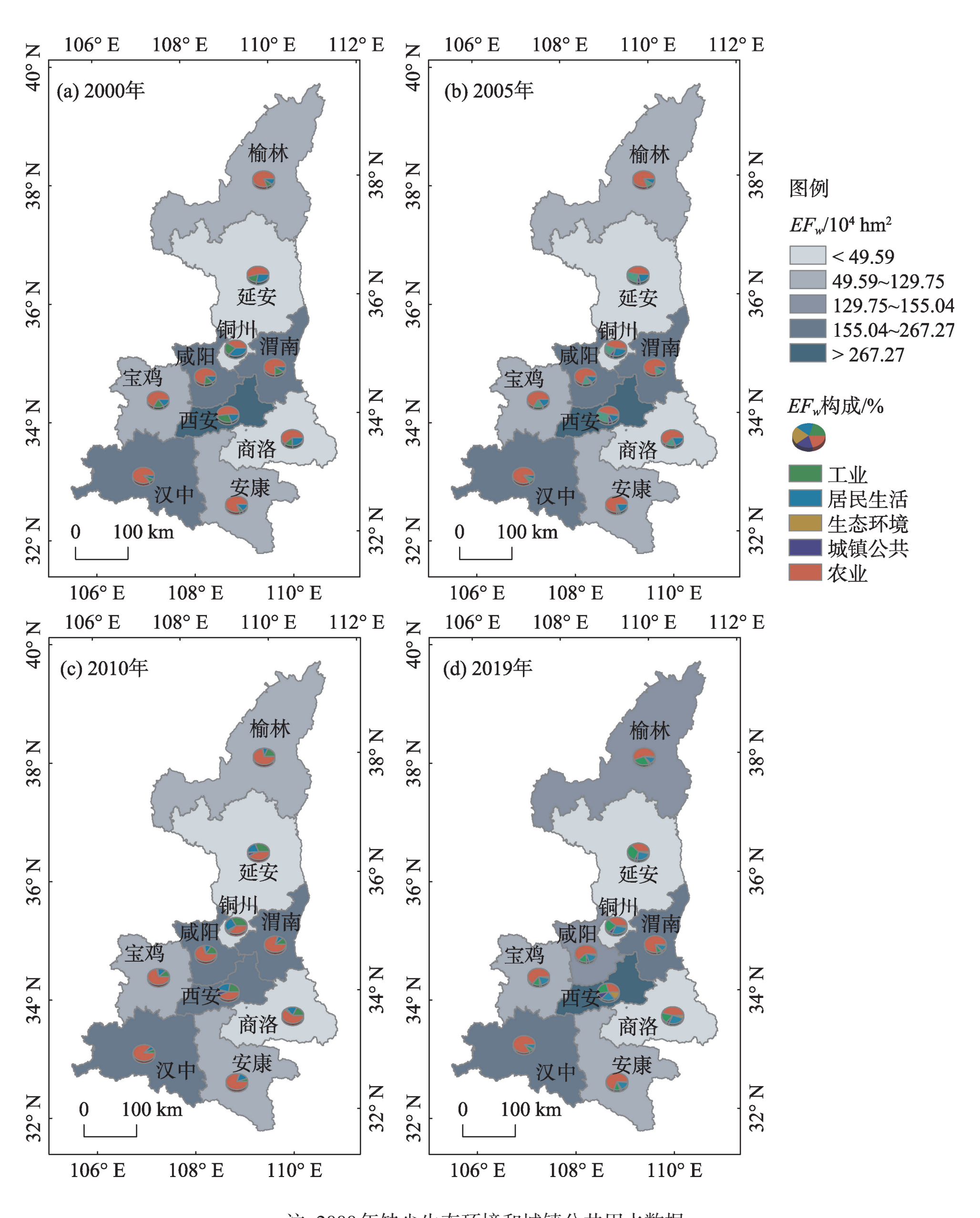
2.2.1 水生态足迹空间格局 陕西省关中和陕南地区水生态足迹(EF_w)值较高,陕北较低。2000年、2005年、2010年和2019年西安市水生态足迹值一直处于全省最高及较高等级,渭南、汉中和咸阳市处于较高等级,安康市位于中等水平,延安、铜川和商洛3市处于全省最低水平。从水生态足迹构成比例看,大部分地市农业所占比重大,其次,是工业和

居民生活，且农业比重呈下降趋势，工业和生态环境比重有所上升，居民生活所占比重较稳定（图3）。2019年，汉中市农业EF_w比例高达84%，居全省首位。

陕西省人均水生态足迹区域差异大，陕北最低，但呈上升趋势，其次为关中地区，较稳定，陕南地区最高，且近10 a有所增长（表4）。2019年陕北、关中和陕南地区人均EF_w分别为0.32 hm^2、0.32 hm^2和0.49 hm^2。汉中市人均EF_w处全省最高水平，铜川市最低，二者相差达4.3倍。

2.2.2 水生态承载力空间格局 陕西省水生态承载力（EC_w）与生态足迹空间匹配度较好，呈南高北低趋势（图4）。汉中市水生态承载力居全省最高水平，且呈上升趋势，2019年EC_w占全省的比重高达61%；安康市居全省第二位，占比比较稳定；铜川市处于全省最低水平，主要由于铜川市河流大多为源头或上游，其特点是流程短、水量少、水位低，能利用的水资源量较少；渭南及榆林市等水生态承载能力也较低。

从人均水生态承载力看，汉中和安康市均处于



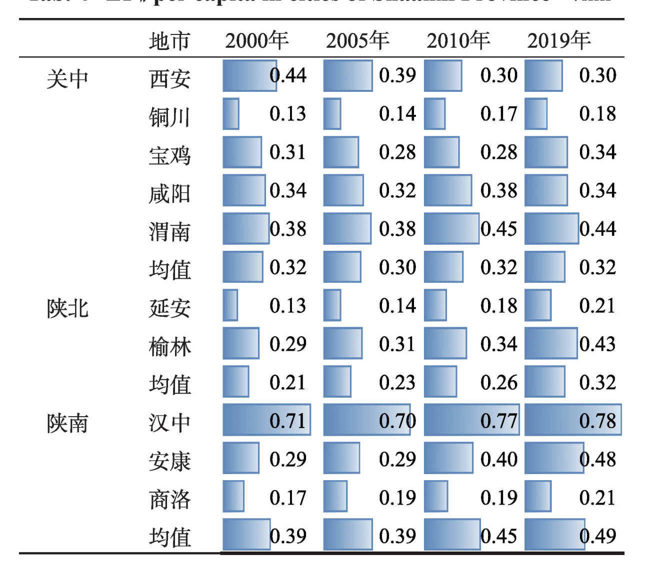
注：2000年缺少生态环境和城镇公共用水数据。

图3 陕西省水生态足迹及其构成时空演变

Fig. 3 Spatial-temporal evolution of water ecological footprint and its composition in Shaanxi Province

表4 陕西省各地市人均EF_w

Tab. 4 EF_w per capita in cities of Shaanxi Province /hm²



	地市	2000年	2005年	2010年	2019年
关中	西安	0.44	0.39	0.30	0.30
	铜川	0.13	0.14	0.17	0.18
	宝鸡	0.31	0.28	0.28	0.34
	咸阳	0.34	0.32	0.38	0.34
	渭南	0.38	0.38	0.45	0.44
	均值	0.32	0.30	0.32	0.32
陕北	延安	0.13	0.14	0.18	0.21
	榆林	0.29	0.31	0.34	0.43
	均值	0.21	0.23	0.26	0.32
陕南	汉中	0.71	0.70	0.77	0.78
	安康	0.29	0.29	0.40	0.48
	商洛	0.17	0.19	0.19	0.21
	均值	0.39	0.39	0.45	0.49

较高水平,2019年分别达9.88 hm²、6.28 hm²,明显高于其他地市。除2005年和2010年,商洛市人均水生态承载力分别达到1.42 hm²和2.18 hm²外,其他城市在4个年份中均小于1 hm²。咸阳市人均EC_w处于全省最低水平,仅0.01 hm²左右。由此可见,陕西省水生态承载力空间分布不均衡,空间差异极大。

2.2.3 水生态盈亏区域差异 总体上看,各地市水生态盈余量之和大于亏损量之和,水资源整体生态环境较好,但是空间分布不均衡(表5)。西安、铜川、咸阳、渭南、延安和榆林市,在研究期内处于水生态亏损状态,其中咸阳和渭南市亏损值相对较高,且处于上升趋势,亟待改善。相反,汉中、安康、商洛和宝鸡市,处于盈余状态,且汉中和安康市盈余值较高,水资源可持续利用能力强。宝鸡市水生态盈余量较低,但较为稳定,未来发展中应加强防范水生态亏损,合理优化利用水资源,加强对雨水、洪水资源的有效利用。

2.3 水生态足迹广度与深度空间格局

2.3.1 总水生态足迹广度与深度区域差异 2000年、2005年、2010年和2019年,陕西省半数以上城市水生态足迹深度(EF_{wd})大于1,分别为7个、6个、6个和6个(表6)。其中,咸阳市水生态足迹深度最大,但呈下降趋势,水资源超载情况有所缓解。2019年渭南、延安和榆林市EF_{wd}也较高,分别为12.88、9.64和6.78;铜川和西安市分别为4.97和1.82,说明上述地区水资源流量资本已不能满足当地水资源需求,需开发利用水资源存量资本。因此,应重点加强上述区域水资源节约利用,加强水利工程建设,保障可持续发展。宝鸡、汉中、安康和商洛市水生态承载力较好。

从水生态足迹广度变化看,汉中市最大,承载力最强,约26×10⁴ hm²以上;西安市位于第二位,不仅水资源流量资本消耗大,还需消耗一定的存量资本才能满足水资源需求;宝鸡和安康市也较高。总体上,水生态足迹广度值高的城市,其水生态足迹深度值较低,水资源可持续性较好。

2.3.2 人均水生态足迹广度区域差异 人均水生态足迹广度可用于反应水资源丰富程度。陕西省人均EF_{ws}值较高的城市包括汉中、安康、宝鸡、商洛和西安市,汉中市人均EF_{ws}值最高,一直处于0.7 hm²以上,远高于其他城市,水资源供给能力强。低值区有铜川、咸阳、渭南、延安和榆林市(表7)。其中,宝鸡和安康市人均EF_{ws}值增长幅度较大,分别由0.12 hm²、0.29 hm²上升到0.34 hm²、0.48 hm²;大部分城市较为稳定。

处于水生态赤字的城市,人均EF_{ws}值低至0.1 hm²以下,水资源严重缺乏。以铜川市为例,2019年人均EF_{ws}仅为0.04 hm²,因此,铜川市重视水利基础设施建设,通过水库加强区域引水、畜水,满足部分用水需求。从陕西省总体水资源供给情况看,蓄、引、提工程供水量占总供水量的比重较高,分别为23.33%、27.92%和11.93%,对于西安、咸阳、榆林等水资源亏损的地区,水利工程设施对水资源的供给起着至关重要的作用。

2.4 水生态足迹影响因素

运用"个体固定效应模型",所得回归模型R^2值和调整后的R^2值均高达0.90以上,且残差平方和较小,综合残差平方和为0.455,模型结果较好。影响因素分析结果表明,有10项指标对水生态足迹的影响十分显著。(1) 经济要素,包括地区生产总值、地方一般公共预算收入、城镇和农村居民的人均可支配收入,4项指标回归系数均为正值。经济水平通过直接和间接的方式增加水资源消耗量,从而影响水生态足迹,直接影响一般促进区域生态环境改善,增加绿化面积,城市环卫等用水增加,进而直接导致水生态足迹的上升。间接影响经济水平的提高会拉动产业发展,从而使工业用水量增加,间接提高区域水生态足迹。(2) 人口对水生态足迹的影响显著。2010年以来,陕西省常住人口的增长,增

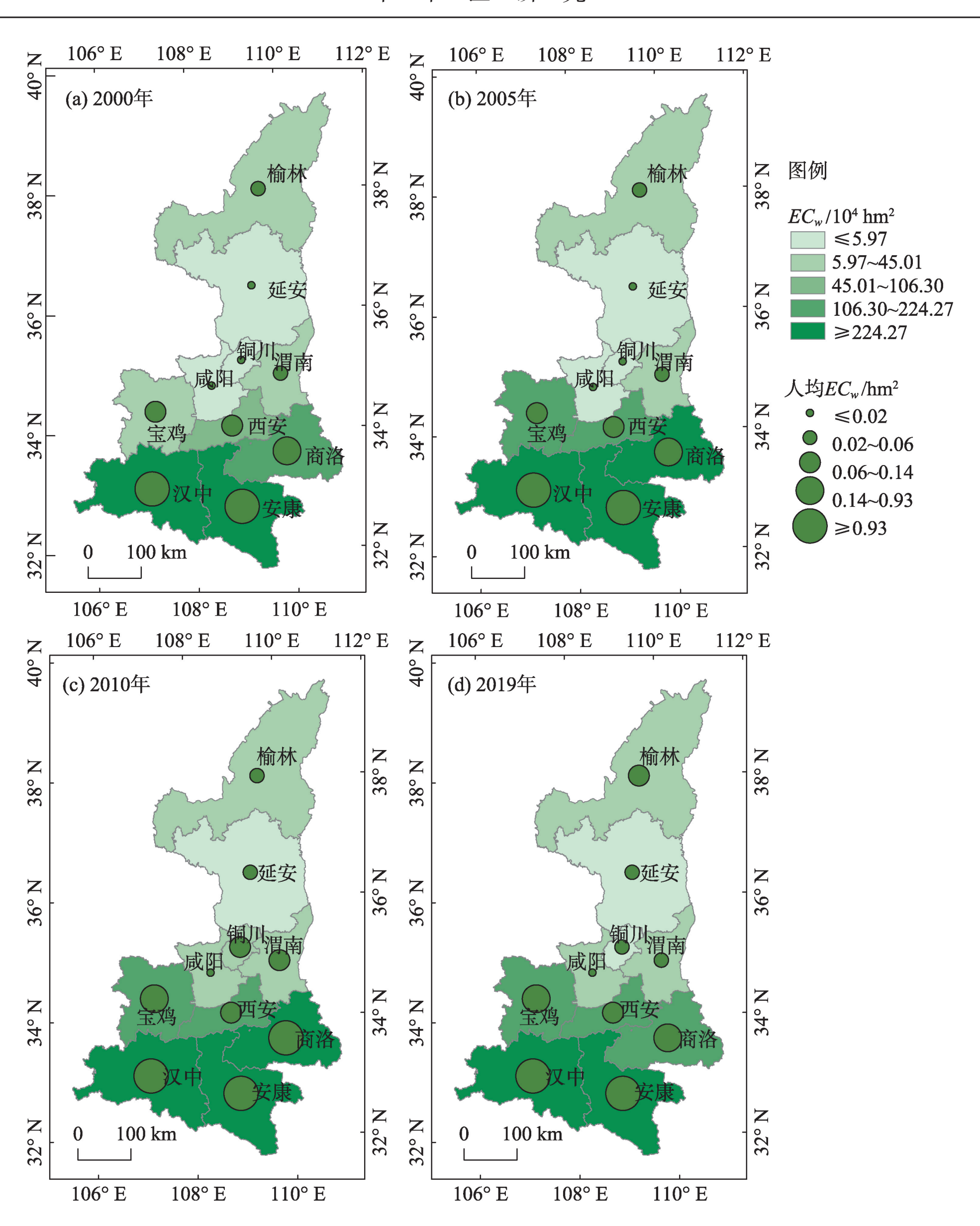


图4 陕西省水生态承载力时空演变

Fig. 4 Spatio-temporal evolution of the water ecological carrying capacity in Shaanxi Province

表5 陕西省各地市水生态盈亏(EB_w)总量及其人均情况

Tab. 5 Total amount of water resources ecological profit and loss (EB_w) of cities in Shaanxi Province and its per capita value

地区	2000年		2005年		2010年		2019年	
	EB_w/10⁴ hm²	人均EB_w/hm²	EB_w/10⁴ hm²	人均EB_w/ hm²	EB_w/10⁴ hm²	人均EB_w/ hm²	EB_w/10⁴ hm²	人均EB_w/ hm²
西安	−196.17	−0.26	−85.29	−0.11	−90.86	−0.11	−140.19	−0.14
铜川	−9.44	−0.11	−10.38	−0.12	−5.62	−0.07	−11.09	−0.14
宝鸡	−68.21	−0.18	27.95	0.08	64.00	0.17	16.27	0.04
咸阳	−162.14	−0.32	−159.98	−0.31	−185.68	−0.36	−148.31	−0.32
渭南	−178.22	−0.33	−183.64	−0.34	−212.14	−0.40	−215.57	−0.41
延安	−20.40	−0.10	−24.59	−0.12	−34.03	−0.16	−41.92	−0.19
榆林	−75.79	−0.22	−88.50	−0.26	−98.91	−0.29	−124.44	−0.36
汉中	965.89	2.56	2207.78	5.86	2276.69	6.66	3129.09	9.10
安康	715.00	2.42	1864.73	6.32	1650.87	6.28	1550.74	5.80
商洛	184.60	0.76	299.31	1.24	465.98	1.99	92.89	0.39

表6　陕西省各地市水生态足迹深度(EF_{wd})与广度(EF_{ws})值变化

Tab. 6　Water ecological footprint depth (EF_{wd}) and size (EF_{ws}) values change of Shaanxi Province

城市	EF_{ws}/10^4 hm^2				EF_{wd}			
	2000年	2005年	2010年	2019年	2000年	2005年	2010年	2019年
西安	106.30	205.44	166.66	170.55	2.85	1.42	1.55	1.82
铜川	1.14	1.35	8.59	2.79	9.28	8.67	1.65	4.97
宝鸡	45.01	103.80	104.13	129.75	2.52	1.00	1.00	1.00
咸阳	5.13	4.48	9.19	6.73	32.58	36.73	21.20	23.04
渭南	21.61	20.65	28.02	18.15	9.25	9.89	8.57	12.88
延安	4.23	4.50	5.97	4.85	5.82	6.46	6.70	9.64
榆林	19.58	16.13	15.46	21.51	4.87	6.49	7.40	6.78
汉中	261.98	262.81	263.47	267.27	1.00	1.00	1.00	1.00
安康	85.12	85.45	104.13	128.43	1.00	1.00	1.00	1.00
商洛	39.67	44.79	44.79	49.59	1.00	1.00	1.00	1.00

表7　陕西省各地市人均水足迹广度

Tab. 7　Water footprint size per capita in cities of Shaanxi Province　/hm^2

地区	2019年水生态盈亏	2000年	2005年	2010年	2019年
西安	赤字	0.15	0.28	0.20	0.17
铜川	赤字	0.01	0.02	0.10	0.04
宝鸡	盈余	0.12	0.28	0.28	0.34
咸阳	赤字	0.01	0.01	0.02	0.01
渭南	赤字	0.04	0.04	0.05	0.03
延安	赤字	0.02	0.02	0.03	0.02
榆林	赤字	0.06	0.05	0.05	0.06
汉中	盈余	0.71	0.70	0.77	0.78
安康	盈余	0.29	0.29	0.40	0.48
商洛	盈余	0.17	0.19	0.19	0.21

加了生活用水,使得区域水生态足迹上升。(3) 农业对水生态足迹的影响,2010—2019年陕西省水田面积呈下降趋势,降低了水生态足迹值;节水灌溉类机械回归系数为0.028,节水设施的完善能够保障区域用水量,使得用水量有所增加。(4) 陕西各地市荒山荒地造林面积呈下降趋势,水资源消耗量减少,降低了水生态足迹。(5) 水库库容对水生态足迹的正向影响显著。由于陕西省水资源时空分布不均,区域内工程供水量占总供水量的比重高达60%以上,水库库容指标能够很好地反应区域工程供水能力。库容越高,对区域的用水保障作用越强,区域水生态足迹相应提高。除上述10项指标外,其余6项指标,如人均日生活用水量、人均公园绿地面积和水浇地面积等对水生态足迹的影响较小。

3　结 论

文章运用水生态足迹模型,从时空两个维度,对陕西省水生态足迹、承载力及其深度和广度进行研究;并从经济、人口、环境、农业和水利5个方面,对水生态足迹影响因素进行分析,主要得出以下结论:

(1) 2000—2019年,陕西省水生态足迹总体呈波动上升趋势,人均水生态足迹较为稳定。农业水生态足迹最高,其次为工业、居民生活水生态足迹;生态环境用水量增加,其水生态足迹增长速度快。陕西省水生态承载力年际变化较大,且多数年份处于水生态盈余状态,整体水生态承载力较好,但个别年份水生态亏损较大,多数年份水资源供给处于均衡状态。全省水生态流量资本的消耗量总体处于波动上升趋势,因此,今后应重点解决水资源年际分配不均衡问题,通过加强水利工程设施,提高蓄水、调水能力,减缓干旱年份水资源亏损问题。

(2) 陕西省各地市水生态足迹与承载力空间匹配度总体较好,但区域间差异大,总体呈“南高北低”的趋势,陕南>关中>陕北地区。汉中市水生态足迹和承载力均处于全省较高水平;延安、铜川和商洛市水生态足迹处于较低水平,且水生态承载力也较低。咸阳市水生态足迹深度最大,但呈下降趋势,水资源超载情况有所缓解;渭南、延安和榆林市水生态足迹深度也较高,对水资源存量资本消耗较多,水资源可持续发展能力有待加强。应加强陕西省内水资源的协调调配。

（3）影响因素分析表明，经济要素通过直接或间接方式，对陕西省水生态足迹产生显著的正向影响。对于经济水平较高的地区，要协调好水资源与经济社会发展的关系，严格控制水资源开发利用上限，坚持节水优先、强化水资源管理，完善节水制度。常住人口的增长，增加了生活用水消耗量，应加强节水宣传教育。节水灌溉类机械的增加，能够保障和提高区域用水量，对于水资源短缺的地区可以适当加强节水灌溉设施建设。陕西省部分地区需要依靠工程供水满足用水需求，水库的建设，对于保障区域用水起到了至关重要的作用。

参考文献(References)：

[1] 陕西省水利厅. 陕西省水资源公报[R]. 西安: 陕西省水利厅, 2020. [Shaanxi Province Department of Water Resources. Shaanxi Water Resources Bulletin[R]. Xi'an: Shaanxi Province Department of Water Resources, 2020.]

[2] 卢亚丽, 徐帅帅, 司保江, 等. 黄河流域九省(区)水资源环境承载力动态演变特征研究[J]. 人民黄河, 2021, 43(11): 103-108. [Lu Yali, Xu Shuaishuai, Si Baojiang, et al. Study on dynamic evolution characteristics of water resources environmental carrying capacity of Nine Provinces and Regions of the Yellow River Basin [J]. Yellow River, 2021, 43(11): 103-108.]

[3] 卢亚丽, 徐帅帅, 沈镭. 基于胡焕庸线波动的长江经济带水资源环境承载力动态演变特征[J]. 自然资源学报, 2021, 36(11): 2811-2824. [Lu Yali, Xu Shuaishuai, Shen Lei. The dynamic evolution of water resources environmental carrying capacity in the Yangtze River Economic Belt based on the fluctuation of Hu Line [J]. Journal of Natural Resources, 2021, 36(11): 2811-2824.]

[4] 郝帅, 孙才志, 宋强敏. 基于ESTDA模型的中国水生态足迹及水生态压力评价[J]. 生态学报, 2021, 41(12): 4651-4662. [Hao Shuai, Sun Caizhi, Song Qiangmin. Evaluation of water ecological footprint and water ecological pressure based on ESTDA model in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(12): 4651-4662.]

[5] 岳晨, 刘峰, 杨柳, 等. 北京市2010—2019年水资源生态足迹和生态承载力[J]. 水土保持通报, 2021, 41(3): 291-295. [Yue Chen, Liu Feng, Yang Liu, et al. Ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Beijing City during 2010-2019[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41 (3): 291-295.]

[6] 李晓格, 张颖, 单永娟. 基于能值生态足迹模型的榆林市水资源可持续利用研究[J]. 干旱区研究, 2022, 39(4): 1066-1075. [Li Xiaoge, Zhang Ying, Shan Yongjuan. Sustainable utilization of water resources in Yulin City based on an emergy ecological footprint model[J]. Arid Zone Research, 2022, 39(4): 1066-1075.]

[7] Dai D, Sun M, Xu X, et al. Assessment of the water resource carrying capacity based on the ecological footprint: A case study in Zhangjiakou City, North China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(11): 11000-11011.

[8] Su Y, Gao W, Guan D, et al. Dynamic assessment and forecast of urban water ecological footprint based on exponential smoothing analysis[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 354-364.

[9] 熊鸿斌, 周银双. 基于三维水足迹-LMDI的安徽省水资源压力及驱动力分析[J]. 水土保持通报, 2019, 39(5): 194-203. [Xiong Hongbin, Zhou Yinshuang. An analysis of water resources pressure and driving forces in Anhui Province based on LMDI-three-dimensional water footprint model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(5): 194-203.]

[10] 朱向梅, 王子莎. 黄河流域碳水足迹评价及时空格局研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(10): 200-211. [Zhu Xiangmei, Wang Zisha. Study on the assessment of carbon and water footprint and its spatial-temporal pattern in the Yellow River Basin[J]. Environmental Science &Technology, 2020, 43(10): 200-211.]

[11] 张倩, 谢世友. 基于水生态足迹模型的重庆市水资源可持续利用分析与评价[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38(2): 93-100. [Zhang Qian, Xie Shiyou. Using ecological water footprint model to analyze sustainable use of water resources in Chongqing[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2019, 38(2): 93-100.]

[12] 方恺. 生态足迹深度和广度: 构建三维模型的新指标[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 267-274. [Fang Kai. Ecological footprint depth and size: New indicators for a 3D model[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(1): 267-274.]

[13] 李鹏辉, 徐丽萍, 刘笑, 等. 基于三维生态足迹模型的天山北麓绿洲生态安全评价[J]. 干旱区研究, 2020, 37(5): 1337-1345. [Li Penghui, Xu Liping, Liu Xiao, et al. Ecological security evaluation of an oasis in the north of the Tianshan Mountains based on three- dimensional ecological footprint model[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(5): 1337-1345.]

[14] 孙才志, 张智雄. 中国水生态足迹广度、深度评价及空间格局[J]. 生态学报, 2017, 37(21): 7048-7060. [Sun Caizhi, Zhang Zhixiong. Assessment of water ecological footprint size, depth, and spatial pattern in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(21): 7048-7060.]

[15] Liang D, Lu H, Feng L, et al. Assessment of the sustainable utilization level of water resources in the wuhan metropolitan area based on a Three-dimensional water ecological footprint model[J]. Water, 2021, 13(24): 3505.

[16] 张义, 张合平, 李丰生, 等. 基于改进模型的广西水资源生态足迹动态分析[J]. 资源科学, 2013, 35(8): 1601-1610. [Zhang Yi, Zhang Heping, Li Fengsheng et al. Dynamic analysis of the water resource ecological footprint of Guangxi based on an improved mode[J]. Resources Science, 2013, 35(8): 1601-1610.]

[17] 莫崇勋, 赵梳坍, 阮俞理, 等. 基于生态足迹的广西壮族自治区水资源生态特征时空变化规律及其驱动因素分析[J]. 水土保持通报, 2020, 40(6): 297-302. [Mo Chongxun, Zhao Shutan, Ru-

an Yuli et al. Spatial-temporal variation of water ecological characteristics of Guangxi Zhuangzu Autonomous Region and its driving factors based on ecological footprint model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2020, 40(6): 297-302.]

[18] 焦士兴, 王安周, 陈林芳, 等. 河南省水生态足迹测度及其驱动效应分析[J]. 水文, 2020, 40(1): 91-96. [Jiao Shixing, Wang Anzhou, Chen Linfang et al. Analysis of water ecological footprint and its driving effects in Henan Province[J]. Journal of China Hydrology, 2020, 40(1): 91-96.]

[19] 刘玉邦, 严雨男. 成都市水生态足迹的时间分布特征及其影响因素[J]. 南水北调与水利科技, 2020, 18(2): 93-98. [Liu Yubang, Yan Yunan. An analysis of time distribution characteristics of water ecological footprint and its influencing factors in Chengdu City[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science &Technology, 2020, 18(2): 93-98.]

[20] 贾陈忠, 乔扬源, 关格格, 等. 山西省水资源生态足迹时空变化特征及驱动因素[J]. 水土保持研究, 2019, 26(2): 370-376. [Jia Chenzhong, Qiao Yangyuan, Guan Gege, et al. Temporal and spatial variations and the driving factors of water resources ecological footprint in Shanxi Province[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2019, 26(2): 370-376.]

[21] 陈义忠, 乔友凤, 卢宏玮, 等. 长江中游城市群水-碳-生态足迹变化特征及其平衡性分析[J]. 生态学报, 2022, 42(4): 1368-1380. [Chen Yizhong, Qiao Youfeng, Lu Hongwei et al. Water-carbon- ecological footprint change characteristics and its balance analysis in the Triangle of Central China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(4): 1368-1380.]

[22] 黄林楠, 张伟新, 姜翠玲, 等. 水资源生态足迹计算方法[J]. 生态学报, 2008, 28(3): 1279-1286. [Huang Linnan, Zhang Weixin, Jiang Cuiling, et al. Ecological footprint method in water resources assessment[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(3): 1279-1286.]

[23] 王宁, 粟晓玲. 陕西关中地区水资源生态足迹与生态赤字研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2013, 41(3): 221-227. [Wang Ning, Su Xiaoling. Ecological footprint and deficit of water resources in Guanzhong, Shaanxi[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2013, 41(3): 221-227.]

[24] Wang H, Huang J, Zhou H, et al. Analysis of sustainable utilization of water resources based on the improved water resources ecological footprint model: A case study of Hubei Province, China[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 262: 110331.

[25] 李菲, 张小平. 甘肃省水资源生态足迹和生态承载力时空特征[J]. 干旱区地理, 2020, 43(6): 1486-1495. [Li Fei, Zhang Xiaoping. Spatio- temporal characteristics of Ecological footprint and ecological carrying capacity of water resources in Gansu Province [J]. Arid Land Geography, 2020, 43(6): 1486-1495.]

[26] 安慧, 范历娟, 吴海林, 等. 基于BP神经网络的淮河流域水生态足迹分析与预测[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(5): 1076-1087. [An Hui, Fan Lijuan, Wu Hailin, et al. Analysis and prediction of water ecological footprint of Huaihe river basin based on BP neural network[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30(5): 1076-1087.]

[27] Yang Y, Cai Z. Ecological security assessment of the Guanzhong Plain urban agglomeration based on an adapted ecological footprint model[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 260: 120973.

[28] 朱光磊, 赵春子, 朱卫红, 等. 基于生态足迹模型的吉林省水资源可持续利用评价[J]. 中国农业大学学报, 2020, 25(9): 131-143. [Zhu Guanglei, Zhao Chunzi, Zhu Weihong, et al. Evaluation of sustainable water resources utilization in Jilin Province based on the ecological footprint model[J]. Journal of China Agricultural University, 2020, 25(9): 131-143.]

[29] 左其亭, 姜龙, 冯亚坤, 等. 黄河沿线省区水资源生态足迹时空特征分析[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 1-8, 34. [Zuo Qiting, Jiang Long, Feng Yakun, et al. Spatiotemporal variation of ecological footprint of water resources in the provinces in the Yellow river basin[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 1-8, 34.]

[30] 李雨欣, 薛东前, 宋永永. 中国水资源承载力时空变化与趋势预警[J]. 长江流域资源与环境, 2021, 30(7): 1574-1584. [Li Yuxin, Xue Dongqian, Song Yongyong. Spatio- temporal characteristics and trend warnings of water resources carrying capacity in China [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2021, 30 (7): 1574-1584.]

[31] 王文国, 何明雄, 潘科, 等. 四川省水资源生态足迹与生态承载力的时空分析[J]. 自然资源学报, 2011, 26(9): 1555-1565. [Wang Wenguo, He Mingxiong, Pan Ke, et al. Analysis of spatio-temporal characteristics of water resources ecological footprint and ecological carrying capacity in Sichuan Province[J]. Journal of Natural Resources, 2011, 26(9): 1555-1565.]

[32] 方恺, 高凯, 李焕承. 基于三维生态足迹模型优化的自然资本利用国际比较[J]. 地理研究, 2013, 32(9): 1657-1667. [Fang Kai, Gao Kai, Li Huancheng. International comparison of natural capital use: A three-dimensional model optimization of ecological footprint[J]. Geographical Research, 2013, 32(9): 1657-1667.]

[33] 方恺, Heijungs Reinout. 自然资本核算的生态足迹三维模型研究进展[J]. 地理科学进展, 2012, 31(12): 1700-1707. [Fang Kai, Heijungs Reinout. A review on Three-dimensional ecological footprint model for natural capital accounting[J]. Progress in Geography, 2012, 31(12): 1700-1707.]

[34] 方恺. 基于改进生态足迹三维模型的自然资本利用特征分析-选取11个国家为数据源[J]. 生态学报, 2015, 35(11): 3766-3777. [Fang Kai. Assessing the natural capital use of eleven nations: An application of a revised three-dimensional model of ecological footprint [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(11): 3766-3777.]

[35] 王周伟, 崔百胜, 张元庆. 空间计量经济学: 现代模型与方法[M]. 北京: 北京大学出版社, 2017: 195-266. [Wang Zhouwei, Cui Baisheng, Zhang Yuanqing. Spatial Econometric: Modern Models and Methods[M]. Beijing: Peking University Press, 2017: 195-266.]

The spatiotemporal patterns of water ecological footprints, depth, size, and influencing factors in Shaanxi Province

MA Xiaolei[1,2], QIAO Yaqi[3], WANG Jie[3], JIAO Shixing[3], ZHANG Man[3]

(1. School of Urban and Environment Sciences, Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, Jiangsu, China; 2. Key Research Base of Philosophy & Social Sciences of Colleges and Universities in Jiangsu, Huaihe River Eco-economic Belt Research Institute, Huaiyin Normal University, Huai'an 223300, Jiangsu, China; 3. School of Resources Environment and Tourism, Anyang Normal University, Anyang 455000, Henan, China)

Abstract: This study measured the spatiotemporal evolution of water ecological footprint, size, and depth in the Shaanxi Province from 2000 to 2019. In addition, the "cross-section fixed effects model" was used to build an indicator system based on the factors influencing water ecological footprint, including economy, population, environment, agriculture, and water conservancy. The results show that: (1) An upward flactuating trend occurred in the water ecological footprint of Shaanxi Province, with a multi-year average of 14.03 million hm^2, and agricultural water accounted for the hight average proportion of ecological footprint with 66.65%, while industrial and domestic water accounted for 15.84% and 13.39%, respectively; (2) The interannual distribution of water ecological carrying capacity showed an unbalanced and fluctuating trends with specific values between 6.035 and 37.41 million hm^2. The annual average of water ecological carrying capacity in Shaanxi was 16.329 million hm^2, which was higher than the water ecological footprint, and showed a surplus water ecological state; (3) In the past ten years, Shaanxi Province mainly consumed the flow capital of water resources, and the size of the water ecological footprint was at high level. However, a large stock capital consumption of water resources occurred in 2001 and 2016; (4) A large difference in the regional water ecological carrying capacity and water ecological footprint was observed in Shaanxi Province, but with a relatively small inter annual change; (5) The economic development level, population, and reservoir storage capacity showed a significant positive impact on the water ecological footprint of Shaanxi Province. To strengthen the ecological carrying capacity of water resources, Shaanxi Province should further improve and consolidate the construction of water conservancy facilities, increase the reservoir capacity, improve the water resources management system, and strengthen the rigid constraints on water resources.

Keywords: water ecological footprint and carrying capacity; water ecological footprint depth; water ecological footprint size; cross-section fixed effects model (CFEM); influencing factors